

## 脚の役割分担を自発的に生成可能な6脚步行の自律分散制御則に関する研究

著者	宮澤 咲紀子
雑誌名	東北大学電通談話会記録
巻	87
号	1
ページ	144-145
発行年	2018-08
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/00123474">http://hdl.handle.net/10097/00123474</a>

修士学位論文要約（平成30年 3 月）

# 脚の役割分担を自発的に生成可能な 6 脚歩行の自律分散制御則に関する研究

宮澤 咲紀子

指導教員：石黒 章夫

## Decentralized Control Rule for Hexapedal Walking Exhibiting Spontaneous Leg Role Assignment

Sakiko MIYAZAWA

Supervisor: Akio ISHIGURO

Despite their limited computational resources, insects exhibit adaptive and versatile locomotion even though some legs are amputated. Although numerous mathematical models for leg coordination have been proposed so far, the walking control mechanism remains still unknown. In this thesis, we reconsidered our previous model by mainly focusing on leg role assignment, which is the key concept for the generation of adaptive locomotion. To be more specific, the novel model was designed with two types of expansion: the addition of the flexibility in limb tip trajectory and the addition of degrees of freedom to the legs. Verification of the validity via hexapod robot showed that the robot adapted to leg amputation with the modification of limb tip trajectories and adapted to leg morphology with the model which has three joints in each leg.

### 1. はじめに

昆虫は限られた計算資源しか持たないにも関わらず、多様な歩行パターン（歩容）を適応的に生成することができる。具体的には、移動速度や身体の故障状況、周囲環境に応じて昆虫は歩容を変化させることが確認されている。このような昆虫の脚制御のメカニズムを解明できれば、未知環境下でも適応的に移動可能な脚式ロボットの創成に繋がると期待できる。

昆虫の脚制御は、主に胸部神経節に存在する神経回路により自律分散的に制御されていると考えられている。この知見に基づき、昆虫の歩行制御メカニズムを説明するためにさまざまな数理モデルが提案されてきたが、その決定打として広く受け入れられているモデルは存在しないのが現状である。筆者らの研究グループではこれまで、「可能な限り要素を削ぎ落としたミニマルモデルを構築することで、昆虫の適応的な歩行運動の根源的メカニズムを解明する」というアプローチを採り、この問題に取り組んできた。先行研究のモデルでは、歩行速度変化に対する歩容遷移や、中脚切断時の振る舞いなど、昆虫が示す多様な振る舞いを再現することに成功した<sup>1)</sup>が、脚の切断パターンによっては歩行が継続できないという問題があった。

そこで本研究では、「脚の役割分担」という観点を導入することにより先行研究のモデルの拡張を試みる。脚式運動においては、身体支持・推進・ブレーキといった力をバランスよく発生させることがポイントとなり、昆虫はこれらの役割を各脚に分担させている。さらに、脚が切断されるというイレギュラーな状態においては、切断された脚が担っていた「身体を支える」という役割を残存した脚で補う“役割の再分配”が起きていると予測できる。以上の考察

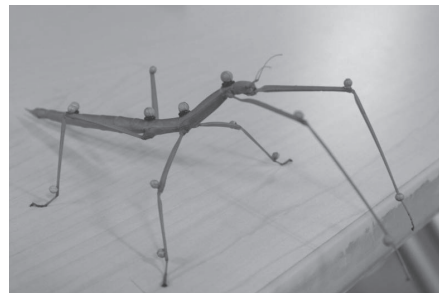


図 1 マーカをつけたナナフシ

を元に、本研究では以下に示す 2 つのアプローチで先行研究のモデルの拡張を行った：

- (1) 脚先軌道を状況に応じて適応的に変化させることで、各脚に身体支持の役割の再分配を行い、脚切断に適応が可能な脚間協調制御則を構築する<sup>2)</sup>。
- (2) 脚内自由度の設定を昆虫に近づけ、各脚が 3 自由度を有する身体モデルにおいて、脚の役割分担を生成可能な脚内協調制御則について検討する<sup>3)</sup>。

紙面の都合上、本稿では (1) についてのみ説明する。

### 2. 行動観察実験

昆虫の脚が切断された場合の振る舞いを観察するため、筆者はナナフシ (*Entoria okinawaensis*, 図 1) の脚切断時の歩行の様子を、モーションキャプチャシステムを用いて計測した。その結果、脚の切断時には、切断脚が有していた役割を補うように残存脚の軌道を変化させ、歩行を継続していることが

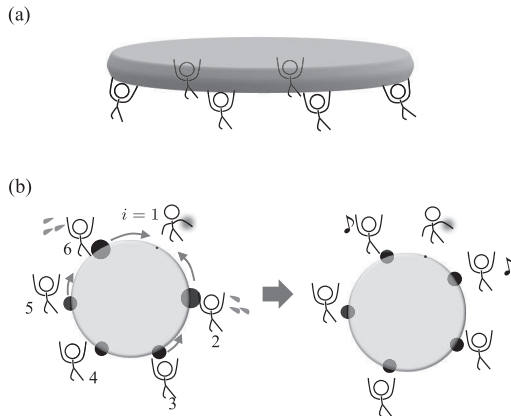


図2 提案制御則のアナログ的理解

わかった。この傾向は、先に Hughes によって報告されたゴキブリの振る舞い<sup>4)</sup>とも類似するため、脚切断時における残存脚の振る舞いの変化は、昆虫の歩行に共通する制御メカニズムによるものであることが示唆された。

### 3. 提案制御則

上記の昆虫の振る舞いを再現するための数理モデルを構築した。ここではアナログを用いて説明する。図2(a)に示すように6人の人が円周上に並び、円盤を運ぶ状況を考える。このような状況の場合、全体のバランスを維持するためには「それぞれの人が位置を調整し、皆がなるべく同等に荷重を支えるようにする」ことが望ましいと考えられる。ここで、図2(b)のように、 $i=1$  がけがをしてしまい、円盤を支えられなくなった状況（右前脚の切断に相当）を考える。この場合、両隣の  $i=2, 6$  は通常状態よりも荷重が多くかかっていると考えられる（図中の黒丸の大きさが負荷量を示している）。しかしながら、このとき  $i=2, 6$  が  $i=1$  に近づき、 $i=3, 5$  がそれぞれ  $i=2, 6$  に近づけば、 $i=1$  以外の5人は均等に荷重を分担できると予想できる。これらの振る舞いは「それぞれの人が、自分との荷重差が大きい隣の人の方向に、その荷重差の分だけ移動する」というルールにより実現できよう。そして、これらの位置の調整結果は前節で述べた昆虫の脚切断時の脚の軌道変化と定性的によく似ていると考えられる。

上記のアナログを数理言語化し、身体状況に応じた脚軌道修正が可能な制御則を構築した。数式の詳細については紙面の都合上割愛する。

### 4. シミュレーション実験結果

シミュレーションを用いて提案制御則の妥当性検証を行った。先行研究のモデルで歩行が困難であった両前脚切断の状況に対しての適応性を検証したと

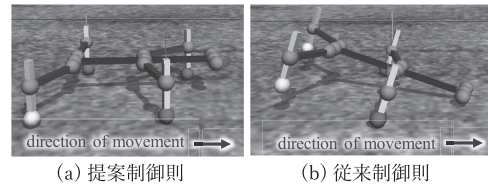


図3 シミュレーション結果：歩行の様子

ころ、提案制御則の効果により脚軌道が修正され、身体の前後方向への傾きづらなくなったことで、歩行続行が可能であることがわかった（図3）。また、両後脚切断など他の切断パターンにおいても、昆虫と同様の脚軌道変化を再現し、歩行の継続を確認した。

### 5. まとめ

本研究では、脚の役割分担という観点に着目し、各脚が状況に応じて適切に役割分担を行うことが可能な6脚歩行の制御則を提案した。昆虫の脚切断時の振る舞いに着目した制御則構築を行い、シミュレーションにて妥当性を検証した結果、昆虫が脚切断時に示す脚先軌道の変化を定性的に再現し、先行研究で歩行が困難であった切断パターンに対しても適応可能であることを示した。

### 文献

- 1) Owaki, D., Goda, M., Miyazawa, S., and Ishiguro, A., “A Minimal Model Describing Hexapedal Interlimb Coordination: The Tegotae-Based Approach”, *Frontiers in neuro-robotics*, Vol.11, pp.29, 2017.
- 2) 宮澤咲紀子, 大脇大, 福原洸, 加納剛史, 石黒章夫: “脚の切断状況に応じた歩行運動を生成可能な6脚ロボットの自律分散制御則”, 第30回自律分散システム・シンポジウム, pp. 127-131, 2018.
- 3) 宮澤咲紀子, 大脇大, 石黒章夫: “脚の役割分担を自発的に生成可能な6脚歩行の脚内協調制御則”, 第18回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 3D4-05, pp. 3073-3076, 2017.
- 4) Hughes, G. M., “The co-ordination of insect movements II. The effect of limb amputation and the cutting of commissures in the cockroach (*blatta orientalis*)”, *J. Exp. Biol.*, Vol. 34, pp. 306-333, 1957.